

冶炼关键参数对于 IF 钢轧材夹杂缺陷的影响

郝 阳¹⁾, 包燕平¹⁾✉, 李任春²⁾, 李太全²⁾, 程 迪²⁾, 陈 霄¹⁾, 王 睿¹⁾

1) 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室, 北京 100083 2) 邯郸钢铁集团有限责任公司, 邯郸 056015

✉通信作者 E-mail: baoyp@ustb.edu.cn

摘 要 针对邯钢 IF 钢冶炼过程, 采用统计学软件 SPSS 中逻辑回归分析、相关性统计、描述性统计等方法, 研究了冶炼过程中关键参数和轧材夹杂缺陷之间的对应关系以及参数间的相关性。结果表明: 在 IF 钢冶炼过程中将转炉终点温度控制在 1695 ~ 1700 °C 之间, 吹氧量控制在 250 m³ 以下, 静置时间控制在 30 ~ 40 min 之间, 加铝前氧位不超过 3.9×10^{-4} 时, IF 钢轧材出现夹杂缺陷的机率减少。由此对现场提出了改善措施。结果表明以上优化措施可以减少 IF 钢轧材中夹杂缺陷的产生。

关键词 炼钢; IF 钢; 夹杂; 统计; 相关性

分类号 TF703.54

Influence of key parameters in steelmaking progress on the inclusion defects of rolled IF steel sheet

HAO Yang¹⁾, BAO Yan-ping¹⁾✉, LI Ren-chun²⁾, LI Tai-quan²⁾, CHENG Di²⁾, CHEN Xiao¹⁾, WANG Rui¹⁾

1) State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

2) Handan Iron Steel Group Co. Ltd, Handan 056015, China

✉Corresponding author, E-mail: baoyp@ustb.edu.cn

ABSTRACT Aiming at the steelmaking process of IF steel in Han-Steel, the relationship between key parameters and the defects of the rolled sheet was investigated, and the correlation among the parameters was also analyzed through the logic regression analysis, correlation statistics, descriptive statistics and other methods in the statistical software SPSS. The results show that the probability of inclusion defects in the rolled sheet reduces in the steelmaking process of IF steel when the end-point temperature of BOF is controlled in the range of 1695–1700 °C, the oxygen blow amount below 250 m³, the holding time in the range of 30–40 min and the oxygen content before adding aluminum below 3.9×10^{-4} . Besides, the improvement measures were carried out and the results show that the optimization measures can reduce the inclusion defects of rolled IF steel sheet.

KEY WORDS steelmaking; IF steel; inclusions; statistics; correlation

IF 钢作为超深冲钢, 被广泛应用于汽车、家电等行业, 为防止深冲过程的开裂, 用户对 IF 钢板材的表面质量有较为严格的要求。影响冷轧薄板表面质量的主要缺陷, 大致可分为两大类, 即常规缺陷和非常规缺陷。常规缺陷的产生与冷轧工艺质量密切相关, 而非常规缺陷主要有沿钢板轧向分布的细线状或条片状、带状缺陷^[1]。

目前, 冶金工作者对于冷轧板表面的非常规缺陷做了大量的研究。通过对 IF 钢冷轧板表面缺陷进行观察分析, 对表面缺陷进行总结, 发现引起表面缺陷的夹杂物主要为脱氧产物和卷渣^[2–5]。张维维、方淑芳、彭其春等^[6–8]主要研究了 IF 钢冷轧板出现的条状缺陷并分析了产生的原因, 结果表明, “黑线”是由钢中夹杂引起的, “亮线”是钢中气泡和夹杂共同作用的结

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: “十二五”科技支撑计划资助项目(2015BAF30B01); 教育部博士点专项基金资助项目(20130006110023); 钢铁冶金新技术国家重点实验室自主基金资助项目(41614014)

果. Miyake 等^[9]发现电磁搅拌有利于减少表面条状缺陷,并且其效果受到钢液中化学成分的影响. Yu 等^[10]通过实验研究了冷轧表面缺陷的演变过程,发现应当通过减少板坯表面硬性夹杂的量来减少表面缺陷. Chen、孟劲松等^[11-12]通过在生产实践中对冶炼工艺进行优化,证明了通过改善工艺,可以减少 IF 钢冷轧板出现表面缺陷的概率. 郭龙波、宋健、李扬等^[13-15]利用 SAS 统计软件分别对冷轧、热轧中影响轧材表面质量缺陷的主要因素进行数据挖掘分析,对产生原因进行定位,找出关键控制变量并做出调整,提高了生产效率,说明通过统计的方法找到影响质量的关键因素是可行的.

以上的研究中尚未涉及冶炼过程参数对轧材夹杂缺陷的影响,而前人的研究也说明轧材的夹杂缺陷产生与冶炼过程密切相关,所以本文利用统计学软件 SPSS 研究了冶炼过程关键参数对冷轧板夹杂缺陷的影响,得到了影响夹杂缺陷产生的主要因素以及参数间的相互关系,并通过实验进行验证.

1 研究方法

本文研究对象为邯钢生产的 DC06 钢种,其生产的工艺路线为:铁水预处理→转炉炼钢→RH 精炼→板坯浇注→钢坯精整→入库→热轧→冷轧,其中转炉吨位为 300 t.

首先对邯钢 IF 钢轧制过程中产生的夹杂缺陷进行收集分析,明确夹杂缺陷产生的主要原因;之后收集邯钢 545 炉次从转炉到冷轧的生产数据,将采集数据进行关联,使冷轧、热轧生产过程中记录的夹杂缺陷情况与冶炼过程中的炉次数据进行对应,将炉次按照对应轧材有无夹杂缺陷使用 1、0 进行标记;最后使用统计学软件 SPSS 对冶炼过程中关键参数与后续轧材产生夹杂缺陷的情况进行分析,得到了冶炼中关键参数对轧材夹杂缺陷的影响情况以及冶炼参数的相互关系. 分析中用到的出现轧材夹杂缺陷炉次所占比例指在冷轧、热轧过程中出现夹杂缺陷的轧材对应的冶炼炉次数占统计总炉次数的比例. 主要的统计过程如图 1 所示.

2 结果与讨论

2.1 IF 钢轧材夹杂缺陷分析

IF 钢轧材在轧制过程中出现一系列的缺陷问题,冷轧板表面条状缺陷为典型的缺陷,光镜下宏观特征如图 2,之后将缺陷放在电镜下进行观察,如图 3.

通过能谱分析图 3 中颗粒成分,发现缺陷中细小的颗粒均为 Al_2O_3 颗粒.

缺陷内部出现大量的被碾碎的 Al_2O_3 颗粒说明在铸坯中夹杂物的尺寸较大,夹杂物来源于附着于水口

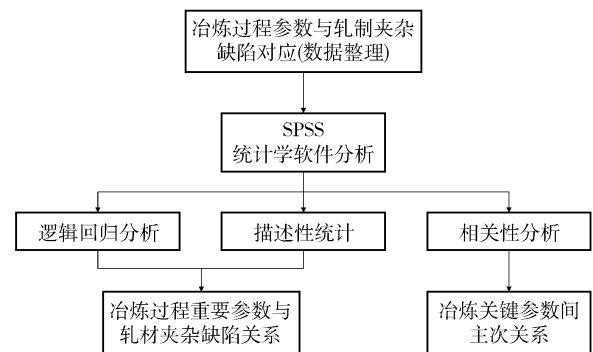


图 1 分析思路流程图

Fig. 1 Flow chart of the analysis method

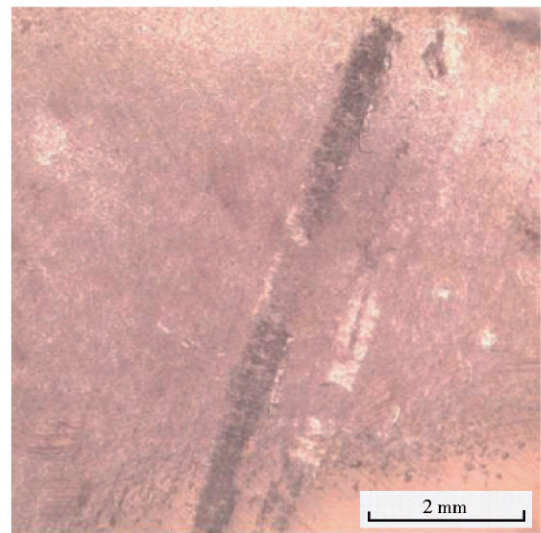


图 2 光镜下的条状缺陷

Fig. 2 Strip defects in the optical microscope

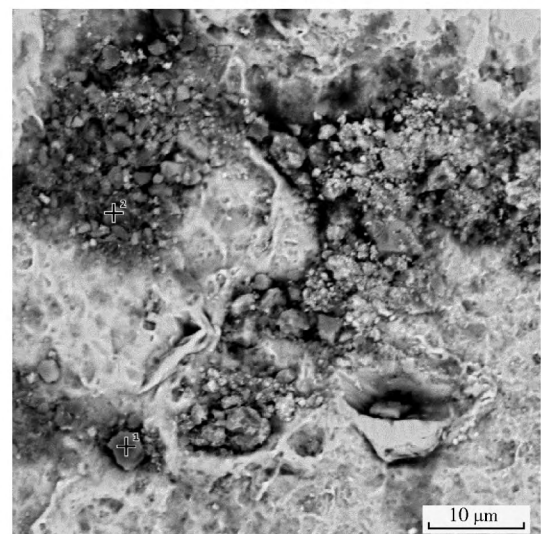


图 3 电镜下条状缺陷内部形貌

Fig. 3 Internal morphology of strip defects in SEM

的堵塞物脱落进入钢中.

除了条状缺陷,还发现了针孔缺陷,在针孔缺陷的

周围发现了 TiN 和 Al_2O_3 夹杂, 并且氧化铝夹杂尺寸较大, 是产生针孔缺陷的主要原因。

通过对冷轧板缺陷分析, 了解到 IF 钢轧材大部分夹杂缺陷与冶炼过程中脱氧产生的氧化铝相关, 而氧化铝的产生与 IF 钢生产过程中转炉、精炼过程中的温度、氧位等参数密切相关。所以有必要研究冷轧板产

生的夹杂缺陷与冶炼参数的对应关系, 找到 IF 钢冶炼参数中影响后期轧制过程产生夹杂缺陷的显著性因素, 从而更好地控制冶金过程工艺参数。

2.2 加铝前氧位、温度的影响分析

对加铝前温度、加铝前氧位及静置时间进行逻辑回归分析, 得到表 1。

表 1 影响轧材夹杂缺陷产生的逻辑回归变量表

Table 1 Logical regression variable table influencing the appearance of inclusion defects in the rolled sheet

项目	常数项估计值	标准误差	卡方值	自由度	相伴概率	优势比
加铝前温度	-0.016	0.013	1.593	1	0.207	0.984
加铝前氧位	0.002	0.002	1.538	1	0.215	1.002
静置时间	0.002	0.009	0.041	1	0.839	1.002
常量	24.636	20.438	1.453	1	0.228	—

逻辑回归模型参数的显著性检验使用 Wals 检验法 (Wals 是一个统计量, 用检验自变量对因变量是否有影响)。统计软件自动统计 Wals 卡方值及相宜的相伴概率, 并据此进行决策。若根据 Wals 卡方值给出检验结论, Wals 卡方值越大越好。若根据相伴概率给出检验结论, 当相伴概率大于等于显著性水平时, 则不应拒绝零假设, 认为自变量模型参数或回归系数与 0 无显著性差异, 该自变量与评定模型之间的线性关系不显著, 否则认为线性关系显著。

虽然加铝前温度、氧位不符合拟定的显著性水平, 但是仍然有一定的显著性, 所以从表示系数的 B 值来看, 加铝前氧位与夹杂缺陷率呈正比、加铝前温度与夹杂缺陷率呈反比, 在一定程度上可以说明相对较高的温度和较低加铝前氧位会减少夹杂缺陷的比例。

接下来通过统计来验证以上结论:

将进站氧控制在 $6 \times 10^{-4} \sim 7 \times 10^{-4}$ 的范围内, 进站温度控制在 $1600 \sim 1620^\circ\text{C}$ 范围内, 吹氧量控制在 100 m^3 以下, 共筛选出 40 组数据, 将数据按加铝前氧位由小到大进行排序, 分为两部分, 得到表 2。

表 2 加铝前氧位的影响

Table 2 Influence of oxygen content before adding aluminum

加铝前氧位/ 10^{-4}	炉次数	出现夹杂缺陷炉次数	比例/%
3.00 ~ 3.91	20	6	30
3.92 ~ 5.20	20	10	50

从表中的数据可以看出, 当其余变量控制在较小的范围内时, 加铝前氧位越高, 出现夹杂缺陷的比例明显越高。

接下来对加铝前温度进行分析, 如图 4 所示。

从图 4 中可以看出, 随着加铝前温度的升高, 出现夹杂缺陷炉次的比例有一定的下降, 尤其在温度较低的时候, 夹杂缺陷的比例较高, 这说明加铝前温度升高

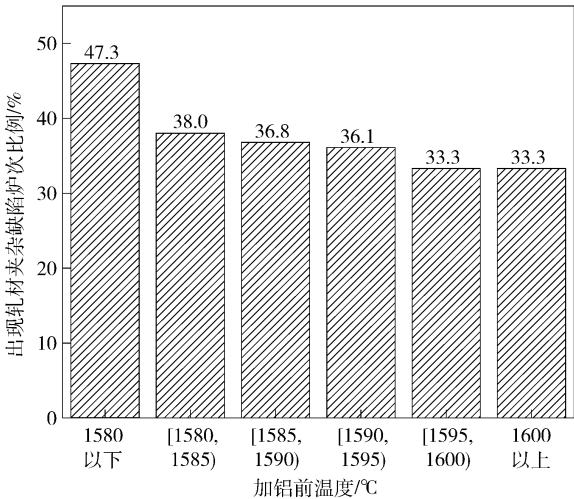


图 4 出现夹杂缺陷炉次比例随加铝前温度分布

Fig. 4 Distribution of the ratio of heat appearing inclusion defects with the change of temperature before adding aluminum

有利于夹杂缺陷的降低。

以上结论是符合理论与实际的。首先, IF 钢冶炼过程中, 加铝前氧位可以代表钢中自由氧在加铝脱氧过程中能与所加的铝反应生成的氧化铝的量, 加铝前氧位越高说明在脱氧过程中生成的氧化铝越多, 这些氧化铝可能不能完全上浮去除以至于进入钢中形成氧化铝夹杂, 造成轧制过程的夹杂缺陷。其次, 当加铝前温度较低时, 现场会在加铝脱氧过程中通过吹氧和增加加铝量来进行升温。以上两个过程由于是同时进行的, 所以对于后期轧制过程中产生夹杂缺陷的影响是相同的, 这点可以通过表中的显著水平看出, 加铝前温度与加铝前氧位对是否出现夹杂缺陷的显著性水平是相似的。

2.3 吹氧量的影响

为了了解吹氧量的分布情况, 作吹氧量分布直方图, 如图 5 所示。

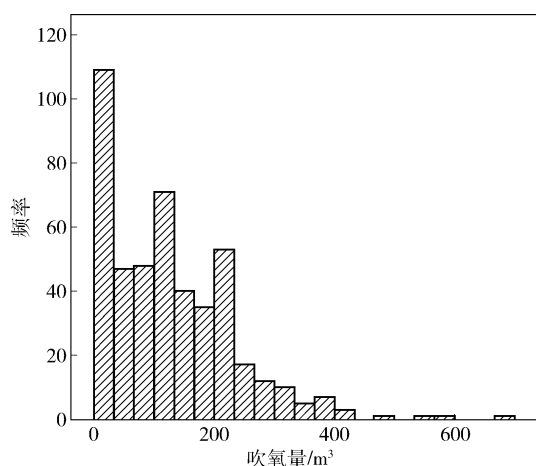


图 5 吹氧量分布直方图

Fig. 5 Distribution of oxygen blow amount

从图 5 可以看出吹氧量主要分布在 250 m^3 以下，吹氧量在 250 m^3 以下的炉次比例为 88.3%。吹氧量与轧材夹杂缺陷的关系如图 6 所示。

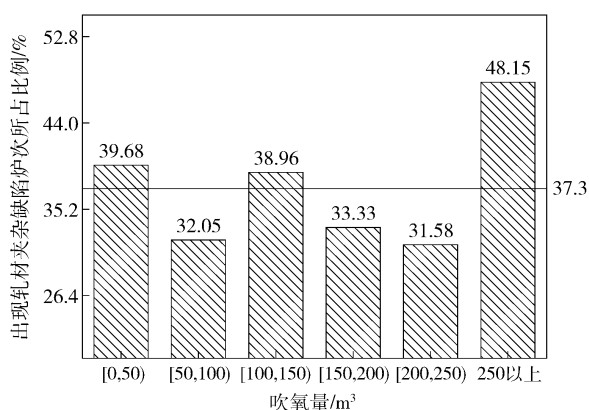


图 6 出现轧材夹杂缺陷炉次比例随吹氧量分布

Fig. 6 Distribution of the ratio of heat appearing inclusion defects with the change of oxygen blow amount

从图 6 可以看出，当吹氧量大于 250 m^3 时，轧材出现夹杂缺陷炉次所占比例高达 48.15%，明显高于平均值 37.3%，说明当吹氧量大于 250 m^3 时，轧制过程中出现夹杂缺陷的比例明显升高。

按照 IF 钢实际生产的规律，进站温度较低时会在进站后进行铝氧升温，在这里设定进站温度 1615°C 为进行铝氧升温的界限，进站温度小于 1615°C 的炉次要进行升温。理论上每吹氧 100 m^3 ，钢水中氧位理论上会增加 5×10^{-4} ，但考虑到氧气的利用率大概为 75% 左右并结合经验，实际上钢中氧位会增加 $(3.50 \sim 4.00) \times 10^{-4}$ ，每 1×10^{-4} 氧与铝反应，钢液升温 3.3°C ，所以每吹氧 100 m^3 ，钢液升温 $11.5 \sim 13.2^\circ\text{C}$ ，氧化铝夹杂生成量为 228 kg。通过计算，当进站温度为 1584°C 时，为了将温度提高到 1615°C ，初期用于铝氧升温的吹氧量约为 250 m^3 。图 7 为 RH 进站温度的频

率分布直方图，进站温度小于 1584°C 的炉次比例为 3.5%，由于这些炉次需要进行铝氧升温，所以这说明有 3.5% 的炉次需要吹氧超过 250 m^3 ，而通过对实际生产数据吹氧量的分析可以得到吹氧量大于 250 m^3 的比例为 11.7%，这说明吹氧量大于 250 m^3 的炉次有 70% 总的吹氧量大于根据进站温度求得的吹氧量，为了进行对比，求得吹氧量大于 100 m^3 的炉次的这一比例为 53.7%，这说明吹氧量大于 250 m^3 的炉次吹氧量明显过多或者后期升温过程吹氧量增多。吹氧量过多导致夹杂缺陷增多，这是吹氧量高于 250 m^3 时夹杂缺陷明显增多的原因。

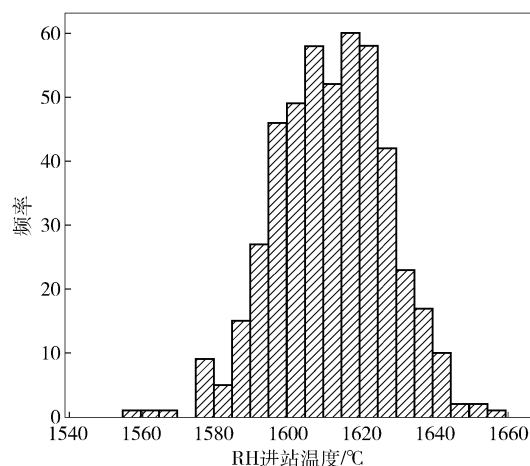


图 7 RH 进站温度分布直方图

Fig. 7 Histogram of the distribution of RH pitted temperature

IF 钢冶炼过程中的吹氧量主要包括两个部分，第一部分用于升温，第二部分用于强制脱碳，其中升温过程分为前期进站升温 and 后期脱氧过程升温。假设前期吹氧量为 200 m^3 ，则前期钢中氧位会增加 $7 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-4}$ ，根据统计，加铝前氧位平均值在 4×10^{-4} 左右，相对于后期加铝前氧位多 $3 \times 10^{-4} \sim 4 \times 10^{-4}$ ，但是由于 RH 中钢液的循环流动，钢中夹杂物更容易被钢渣吸附，并且从前期铝氧升温到后期脱氧过程的时间间隔在 20 min 左右，所以前期铝氧升温生成的氧化铝经过 20 min 的上浮后总量相对于后期脱氧过程生成的氧化铝量已经很小。脱氧之后到出站之间 RH 循环时间在 12 min 左右，并不能完全使氧化铝夹杂被渣吸附，所以后期铝氧升温伴随脱氧过程所产生的氧化铝是钢中氧化铝的主要来源。所以应当提高 RH 的进站温度，减少后期升温的比例，或者尽量将升温过程放在前期，减少后期吹氧量。

2.4 转炉终点温度的影响

图 8 为转炉终点温度与轧材出现夹杂缺陷的炉次所占比例的条形图。从图中可以看出转炉终点温度对夹杂缺陷有明显影响：从整体上看，转炉终点温度越高，出现夹杂缺陷的比例有明显减小的趋势；当转炉终

点温度在 1695 ~ 1700 °C 时, 出现夹杂缺陷的比例最小。温度高于 1700 °C 时, 出现夹杂缺陷的比例有小幅增加。

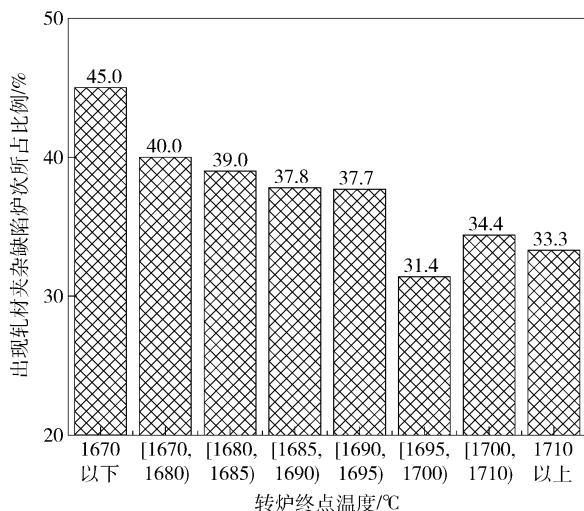


图 8 出现轧材夹杂缺陷炉次比例随转炉终点温度分布

Fig. 8 Distribution of the ratio of heats appearing inclusion defects with the change of end-point temperature of BOF

以上结果符合冶炼的实际过程: 当终点温度较低时, 由于 RH 过程中吹氧升温会造成生成的氧化铝的量增多; 而通常转炉终点温度高相应的终点氧位也高, 这对 RH 阶段产生的氧化铝的量也有一定影响。所以从以上的统计分析来看, 应当将转炉终点温度控制在 1695 ~ 1700 °C 之间。

2.5 静置时间的影响分析

首先统计了 350 炉次的静置时间, 绘制静置时间分布条形图, 如图 9 所示。

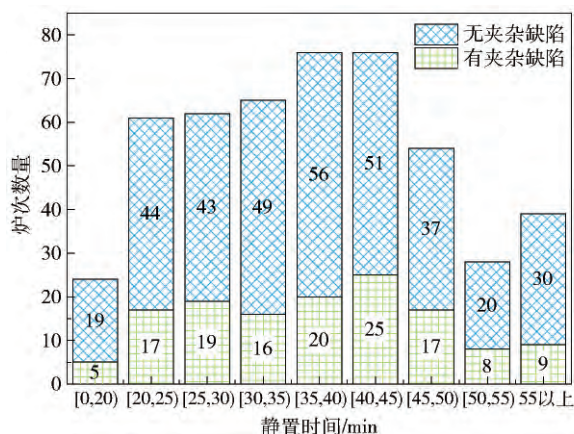


图 9 不同静置时间下炉次数量分布

Fig. 9 Relationship between furnace numbers and the holding time

从图 9 可以看出大部分炉次静置时间分布在 20 ~ 50 min 之间。对各区间夹杂缺陷率进行统计, 绘制条形图, 如图 10。从图 10 中可以看出静置时间在 30 ~ 40 min 的时间内夹杂缺陷率明显小于两侧的夹杂缺陷

率。这说明静置时间在 30 ~ 40 min 的范围内, 夹杂缺陷出现的概率较小, 冶炼中应当将静置时间控制在 30 ~ 40 min 之间。

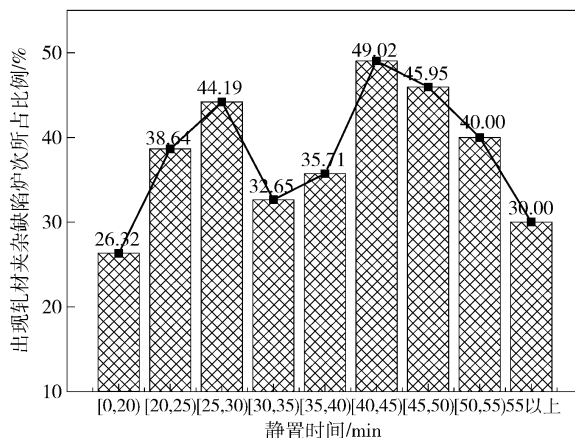


图 10 出现轧材夹杂缺陷炉次比例随静置时间分布

Fig. 10 Distribution of the ratio of heat appearing inclusion defects with the change of holding time

RH 处理后如采取镇静工艺, 镇静时间过长将导致钢液温降过大, 且易使钢水发生二次氧化, 但镇静处理的时间过短, 钢液中未上浮的夹杂物较多, 将影响铸坯产品的洁净度。实验证明钢中的夹杂物水平随着镇静时间的增长呈现先下降后增加的趋势^[16], 与本文统计结果吻合。

2.6 浇注时期的影响

通常情况下, 在浇注的前期、后期, 由于非稳态浇注, 铸坯质量会下降, 头坯和尾坯中全氧含量以及大型夹杂物含量高于正常坯^[17]。因此对每个浇注不同时期的轧制夹杂缺陷率进行统计分析, 研究浇注前期、后期是否有夹杂缺陷明显增加的现象。

大部分浇注都是浇 6 炉钢, 因此将前一炉记为浇注前期, 二、三、四炉记为浇注中期, 四炉以后记为浇注后期, 进行统计得图 11。

从图 11 中可以看出前期、后期出现轧材缺陷炉次所占比例均稍高于浇注中期, 这说明前期非稳态浇注与后期水口堵塞对轧材夹杂缺陷有一定影响。但是前中后期的夹杂缺陷炉次比例均在均值附近, 并没有出现较大的差距, 这说明浇注的前中后期差别不大, 并不能对夹杂缺陷的产生造成明显的影响。出现这种情况的原因可能为钢液可浇性控制的较好, 在后期水口并没有明显的堵塞; 有明显液面波动对应的铸坯已经进行封锁处理, 没有对后期轧制过程造成影响。

2.7 冶炼关键参数相关性

相关系数是用以反映变量之间相关关系密切程度的统计指标, 在冶炼过程中, 各参数之间存在一定的关系, 通过分析参数之间的相关性, 可以将冶炼关键参数之间的关系通过相关系数量化。

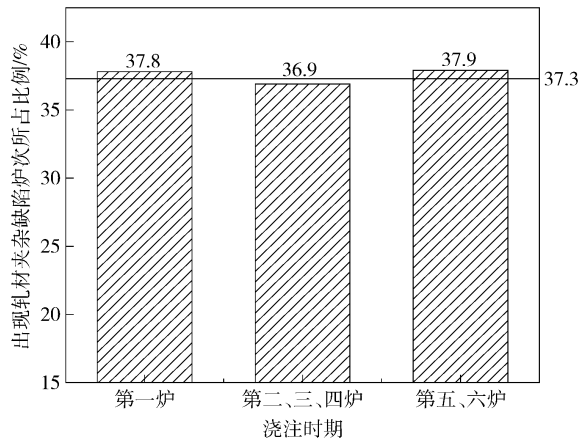


图 11 不同浇注时期出现夹杂缺陷炉次所占比例分布情况

Fig. 11 Distribution of the ratio of heat appearing rolling inclusion defects in different casting periods

作转炉终点温度与后续温度相关系数条形图,如图 12.

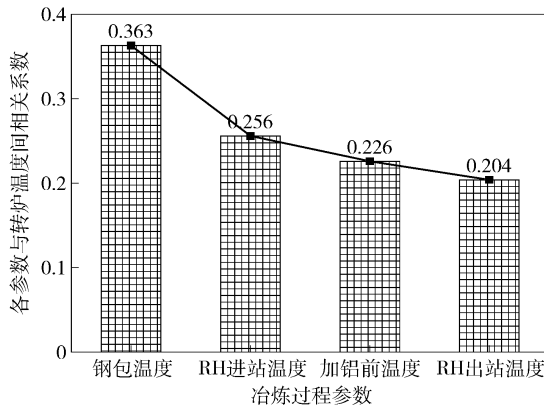


图 12 转炉终点温度与后续温度的相关系数

Fig. 12 Correlation coefficients between the end-point temperature of BOF and temperatures in subsequent periods

从图中转炉终点温度与 RH 冶炼过程中温度的相关性来看,转炉终点温度对 RH 过程中的温度的影响均是显著的,并且相关性逐渐降低.这说明转炉终点温度对于整个 RH 冶炼过程都是有影响的,对于 RH 温度控制至关重要.

转炉终点温度与出钢温降的相关系数高达 0.705,图 13 为出钢温降与转炉终点温度的散点图,说明转炉终点温度与出钢温降是明显相关的,终点温度越高,出钢过程温降越大.

分析吹氧量与其他参数的相关性.吹氧量主要与冶炼过程中温度的相关系数较大,与进站温度呈负相关,与出站温度呈正相关,并且吹氧量与 RH 进站氧位呈负相关,具体的相关系数如图 14 所示.其中吹氧量与进站温度之间的相关系数较大,图 15 也说明了吹氧量与进站温度呈负相关并且有良好的相关性.从相关性上说明吹氧量受到进站温度以及进站氧的影响,并

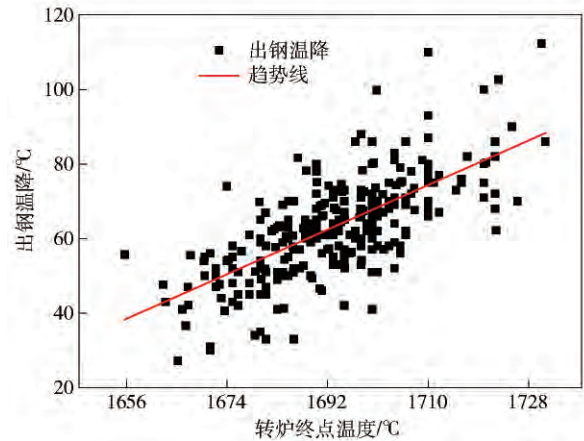


图 13 出钢温降与转炉终点温度关系

Fig. 13 Relationship between tapping temperature drop and end-point temperature of BOF

且吹氧量会影响出站的温度.所以吹氧量对于精炼温度的控制起到非常重要的作用.除此之外,吹氧量与 RH 处理时间关系显著并且相关系数为 0.237,说明吹氧量越多, RH 处理时间越长,操作越复杂.

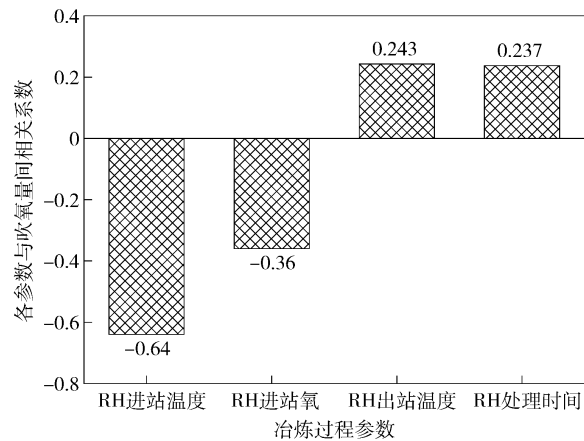


图 14 吹氧量与其他参数的相关系数

Fig. 14 Correlation coefficients between the oxygen blow amount and other parameters

2.8 优化结果验证

通过以上统计分析,针对 IF 钢冶炼现场情况,制订了一系列改进措施,其中最重要的是将转炉终点温度控制在 1695 ~ 1700 °C,其次是在精炼阶段控制吹氧量不超过 250 m³,加铝前氧位控制在 3.9×10^{-4} 以下,静置时间控制在 30 ~ 40 min 之间.在现场工艺参数按照改进措施进行调整之后,统计了各月份出现轧材缺陷炉次所占比例的变化情况,如图 16.

从图 16 中可以看出 IF 钢轧材夹杂缺陷炉次所占比例有所降低并且有逐月减少的趋势,说明通过控制上述研究中得到的影响轧材夹杂缺陷产生的关键冶炼参数,可以达到减少轧材夹杂缺陷出现的效果.

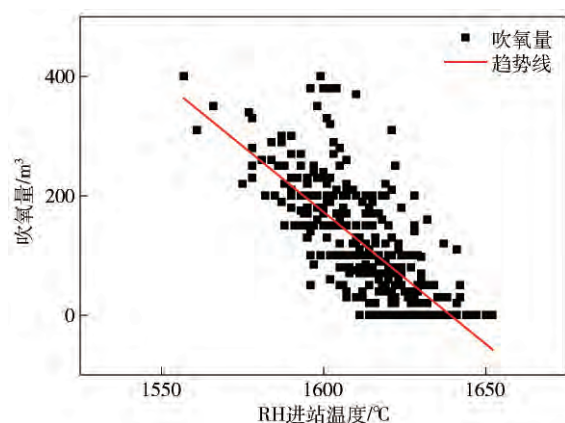


图 15 吹氧量与 RH 进站温度关系

Fig. 15 Relationship between oxygen blow amount and RH pitted temperature

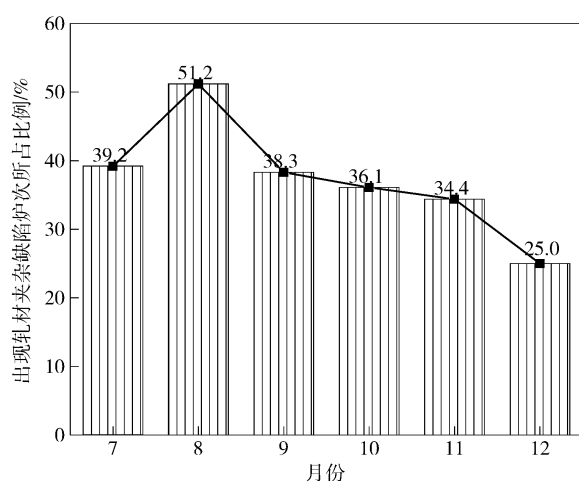


图 16 出现夹杂缺陷炉次所占比例随月份变化情况

Fig. 16 Change of the ratio of heat appearing inclusion defects in 6 months

3 结论

(1) 通过对 IF 钢轧材夹杂缺陷的研究分析,发现造成缺陷的主要夹杂物为脱氧过程产生的 Al_2O_3 , 其产生原因与冶炼过程的工艺参数密切相关。

(2) 通过对 IF 钢冶炼关键参数与冷轧板夹杂缺陷关系以及冶炼参数间的相关性进行研究,在 IF 钢冶炼过程中应当将转炉终点温度控制在 $1695 \sim 1700^\circ\text{C}$, 吹氧量不应超过 250 m^3 , 静置时间控制在 $30 \sim 40 \text{ min}$, 加铝前氧位不超过 3.9×10^{-4} 。这些改善措施均有利于减少精炼过程中氧化铝夹杂产生,从而减少冷轧板出现夹杂缺陷的概率。

(3) 利用以上研究结果对现场 IF 钢冶炼工艺进行优化之后,轧材出现夹杂缺陷的炉次比例有一定降低。

参 考 文 献

[1] Gao W F. Research on surface defects of cold rolled sheet. *Steel-*

making, 2006, 22(3): 22

(高文芳. 冷轧薄板表面缺陷研究. 炼钢, 2006, 22(3): 22)

- [2] Cui H, Wu H J, Yue F, et al. Surface defects of cold-rolled Ti-IF steel sheets due to non-metallic inclusions. *J Iron Steel Res Int*, 2011, 18(Suppl 2): 335
- [3] Zhu G S, Yu H X, Wang W J, et al. Study of surface defects of cold-rolled IF steel sheet. *Iron Steel*, 2004, 39(4): 54
(朱国森, 于会香, 王万军, 等. IF 钢冷轧板表面缺陷研究. 钢铁, 2004, 39(4): 54)
- [4] Wang X H. Non-metallic inclusion control technology for high quality cold rolled steel sheets. *Iron Steel*, 2013, 48(9): 1
(王新华. 高品质冷轧薄板钢中非金属夹杂物控制技术. 钢铁, 2013, 48(9): 1)
- [5] Tian J. *Research of Surface Defect in Cold-rolled Sheet Induced by Inclusions* [Dissertation]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2009
(田俊. 冷轧板夹杂类表面缺陷研究 [学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2009)
- [6] Zhang W W, Li X W, Lü C F. Surface sliver defect of cold-rolled IF steel sheet. *J Iron Steel Res*, 2009, 21(7): 59
(张维维, 李晓伟, 吕春风. IF 钢冷轧板表面条状缺陷. 钢铁研究学报. 2009, 21(7): 59)
- [7] Fang S F. Discussion on characteristic and forming reason of faint sliver defect in cold-rolled steel sheet. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2002, 23(2): 59
(方淑芳. 冷轧板条痕缺陷的特征及形成原因探讨. 钢铁钒钛, 2002, 23(2): 59)
- [8] Peng Q C, Tian J, Yin H F, et al. Causes of linear defects on the surface of cold-rolled sheet: analysis and discussion. *J Wuhan Univ Sci Technol*, 2009, 32(1): 15
(彭其春, 田俊, 尹会芳, 等. 冷轧板表面线状缺陷成因分析与探讨. 武汉科技大学学报. 2009, 32(1): 15)
- [9] Miyake T, Morishita M, Nakata H, et al. Influence of sulphur content and molten steel flow on entrapment of bubbles to solid/liquid interface. *ISIJ Int*, 2006, 46(12): 1817
- [10] Yu H X, Ji C X, Chen B, et al. Characteristics and evolution of inclusion induced surface defects of cold rolled IF sheet. *J Iron Steel Res Int*, 2015, 22(Suppl 1): 17
- [11] Chen Y, Zeng J H, Wu G R. Control for surface faint-sliver defects in cold-rolled IF steel sheet. *Adv Mater Res*, 2011, 396-398: 1145
- [12] Meng J S, Jiang M F, Zhu Y X. Practice for reducing surface inclusions of IF steel for cold rolled strip. *Iron Steel*, 2005, 40(12): 28
(孟劲松, 姜茂发, 朱英雄. 减少冷轧 IF 钢表面夹杂物的生产实践. 钢铁, 2005, 40(12): 28)
- [13] Guo L B. *The Defect Analysis for the Surficial Quality of the Cooling System based on Data Mining Technology* [Dissertation]. Anhui: Anhui University of Technology, 2012
(郭龙波. 基于数据挖掘方法的冷轧表面质量缺陷分析 [学位论文]. 安徽: 安徽工业大学, 2012)
- [14] Song J. *Analysis on the Surface Defects of Hot Strips based on Data Mining Methods* [Dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008

- (宋健. 基于数据挖掘方法的热轧带钢表面质量缺陷分析 [学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2008)
- [15] LI Y, Wang J, Zhang Y J. Quality analysis method for hot strip based on data mining. *Chin J Eng*, 2015, 37(Suppl 1): 56
(李扬, 王京, 张勇军. 基于数据挖掘的热轧带钢质量分析方法. 工程科学学报, 2015, 37(增刊 1): 56)
- [16] Cui H, Tian E H, Chen B, et al. Cleanliness study of IF steel by holding in ladles after RH vacuum process. *J Univ Sci Technol Beijing*, 2014, 36(Suppl 1): 32
(崔衡, 田恩华, 陈斌, 等. RH 真空精炼后 IF 钢镇静工艺的洁净度研究. 北京科技大学学报, 2014, 36(增刊 1): 32)
- [17] Peng Q C, Yu X S, Xiong W, et al. Cleanliness of high strength steel slabs in different casting stages. *J Wuhan Univ Sci Technol*, 2012, 35(6): 401
(彭其春, 于学森, 熊伟, 等. 不同浇铸阶段高强钢铸坯洁净度研究. 武汉科技大学学报, 2012, 35(6): 401)